第47卷 第2期
2024年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 2
Feb. 2024

居住自选择视角下城市建成环境对通勤模式选择的影响
——以兰州市主城区为例

郭 燕， 张志斌， 陈 龙， 马晓敏， 赵学伟

（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：交通方式选择研究对于城市高效、可持续和安全的交通规划至关重要。以兰州市主城区为例，基于分布式认知理论，采用调查问卷数据、路网数据、POI数据，通过结构方程模型探讨居住自选择效应影响下非随机异质性的建成环境对通勤模式选择的影响。结果表明：(1) 居民根据自身社会经济属性及态度偏好选择不同建成环境特征的住宅小区，继而形成特定的通勤模式，说明居住自选择存在偏好异质性，居住自选择效应存在。(2) 在规避居住自选择效应后，建成环境依然对通勤模式选择具有显著影响。具体来讲，人口密度、路网密度及停车位数量直接影响通勤模式选择，路网密度、公交站点可达性、地铁站点可达性及停车位数量通过中介变量通勤距离与小汽车拥有间接影响通勤模式选择。(3) 高人口密度、密路网与高可达性的建成环境通过提高道路网络的连通性、步行与公共交通的连接性进一步推动积极通勤模式与公共交通通勤模式选择，引导居民向积极通勤模式为主导的出行结构转变。

关 键 词：建成环境；通勤模式；居住自选择；结构方程模型；兰州市

文章编号：1000－6060(2024)02－0307－12(0307～0318)

进入21世纪以来，受城市化快速推进、城市空间扩张及机动化水平增长的影响，居民日常出行方式逐渐由积极出行（即步行与自行车骑行）转向机动车出行，带来了交通拥堵、交通事故及环境污染等一系列城市问题，而对机动车的过度依赖也造成了能源消耗及碳排放的增加[1]。据国际能源机构（IEA）的最新研究报告，交通已成为碳排放第二大来源[2]。在中国，居民通勤出行量为日常总出行量的39.31%[3]。由此，如何通过引导居民转换日常通勤模式解决城市问题并实现交通可持续发展成为学者与城市管理者关注的焦点。

20世纪60年代以来，发达国家"外延式"的城市扩张模式导致汽车的需求迅速增长。为减少个人对汽车的依赖以及交通的可持续发展，对居民出行行为的影响因素研究逐渐深入。这些因素大致可分为四大领域：社会经济和人口属性[4]；出行类型和出行方式特征[5]；城市空间结构和建成环境[6]；行为倾向和心理因素[7]。仅从地理和规划角度审视，学者更加关注不同出行模式选择对建成环境的影响，以此调节与优化出行模式结构[8]。建成环境可以通过密度、混合度、道路设计、目的地可达性、到交通站点的距离5D维度定量刻画[9]，然而，目前仍未就不同建成环境变量对模式选择行为的影响达成一致。

中国城市居住区规划由严格功能分区的"单位配给制"向市场化下"以人为本"的个性化供给转型[10]，居住环境发生了重大变化并带动了出行方式的转变。由此，学者们开展了对中国城市建成环境与出行行为关系的研究。研究初期，通常采取整体研究的方法将社区划分为不同类型以比较居民的出行行为或社区类型对出行行为的影响。发现拥有单位住房的居民在私家车上花费的时间明显

收稿日期：2023-02-21； **修订日期：**2023-04-24
基金项目：国家自然科学基金项目(41961029)资助
作者简介：郭燕(1997-)，女，硕士研究生，主要从事城市与区域规划等方面的研究. E-mail: g212712@126.com
通讯作者：张志斌(1965-)，男，教授、博士生导师，主要从事城市与区域规划等方面的研究. E-mail: zbzhang@nwnu.edu.cn

少于拥有其他来源住房的居民,积极出行的概率明显偏高[11]。这表明职住不平衡是决定通勤时间、通勤距离及依赖机动车出行的主要原因。研究后期,逐渐从建成环境的不同维度出发对居民出行行为进行分析。在密度方面,单位用地面积所承载的人类活动强度大的地区有利于缩短出行距离,如人口、建筑密度高的地区出行时间短、非机动化出行机率高[12];在多样性方面,土地利用混合度高、城市功能多样的地区有利于降低机动化出行概率[12];在设计方面,路网密度高、地块尺度小、交叉路口多的区域,居民倾向于选择积极出行方式[13];在到公交站点的距离方面,距离越近,居民选择公共交通方式出行的可能性就越高[14-15];在目的地可达性方面,居住地距城市中心的距离对机动车通勤方式的选择影响显著,随着居住地距城市中心距离的增加,公共交通出行的可能性降低,机动车出行的概率上升[16]。相比之下,与通勤模式相匹配的基础设施供给关注较少。

综上,研究大多关注建成环境对居民通勤行为的直接影响,忽略了中介变量起到的间接影响。同时,国内外只有少数研究考虑到居住区的自选择问题。居住自选择是指居民因其自身的社会经济属性及态度偏向而选择不同建成环境的住宅,通勤模式受到选择偏差的影响[17]。然而,由此产生的直接、间接影响可能存在互补的反弹效应[18],建成环境对居民的行为认知产生直接刺激作用。认知结构无法独立于外在环境而存在,与空间结构是一个整体,因此,分布式认知理论的引入,“5D”建成环境指标与“地域力”的结合,将空间-行为互动理论拓展到地理学中,使得可以在系统性、综合性的视角下理清个体特征、地域环境和社会文化对居民通勤行为的多层次影响。现有研究多以北京[19]、上海[12]、广州[20]等经济、文化发达的城市为研究区域,对中西部欠发达地区关注较少。因此,本文以兰州市主城区为例,基于分布式认知理论框架构建结构方程模型,检验建成环境对通勤方式选择的影响机理,为绿色交通模式和居民出行模式转变提供新的政策切入点。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

兰州市作为中国西北地区的重要中心城市,也是唯一黄河穿城而过的省会城市,受河谷地形及南北两山的限制,形成“两山夹一川”的带状城市形态。其主城区作为人口主要集聚地区,占市区总人口的84.05%,具有以下特征:(1) 交通干道路网不完善,在城市蜂腰地段、跨河与跨铁路地段形成瓶颈,“东西拥挤、南北不畅”始终是兰州城市交通难以解决的顽疾;道路网密度(4.13 km·km^{-2})远低于全国主要城市平均水平(5.96 km·km^{-2})。(2) 轨道交通线路单一,仅有东西向一条,年日均客运量为1.7×10^{5}人次,分担率仅为公交出行的9.1%,且与公交网络衔接率不足10%。(3) 城市交通流方向性特征显著,道路交通负荷不平衡。受中心城区东西狭长的地形限制,交通干道主要沿黄河两岸延伸,导致东西向道路交通量占到了总交通量的70%以上,使得通勤高峰特别容易出现交通拥堵。因此,本文选取主城区为研究区域,即城关区、七里河区、安宁区、西固区(图1)。

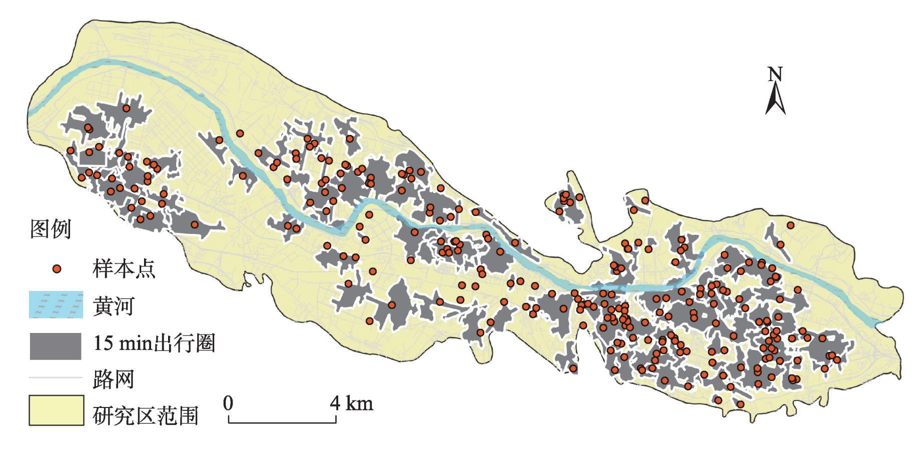


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

数据包括建成环境等空间数据与实地问卷调查数据两部分。建成环境数据包括高德地图居住小区POI数据、Worldpop人口栅格数据以及谷歌遥感影像数据所获取的基础地理信息空间数据。

社会经济属性数据及居民通勤模式数据来源于调查问卷。在保证调查数据科学性、代表性的前提下，按照街道人口密度分布采用随机抽样与交叉控制配额抽样(性别、年龄)相结合的方法进行问卷调查，正式问卷调查前，选取邻近小区居民进行了预测试，并根据居民的反馈对调查问卷进行了修改。2020年10月1日—11月25日在社区活动中心和开放空间采取面对面、随机拦截的方式进行了正式问卷调查，对18岁及以上居民的通勤出行方式、出行态度偏好及社会经济属性等信息进行记录，共获取有效样本1384个，样本的社会经济属性见表1所示。运用SPSS中信度检测刻度，检测结果显示信度检测刻度α值为0.784，大于0.7，问卷数据通过信度检验。

1.3 研究方法

结构方程模型是基于变量的协方差矩阵，是分析变量之间关系的多元数据分析工具[21]。可以测量一组变量之间的多重关系，其中某个变量可以是一组关系中的结果(或因变量)，或其他关系中的预测变量(或解释变量)[22-23]。本文探究建成环境对通勤模式选择的影响，通勤模式为四分类变量，且存在变量之间的直接或间接影响。因此构建结构方程模型，通过最大似然估计方法分析建成环境对通勤模式选择的影响。

表1　样本社会经济属性

Tab. 1　Socioeconomic attributes of the survey samples

变量	变量符号	样本量	变量描述	变量	变量符号	样本量	变量描述
性别	GENDER	1384	虚拟	家庭规模	HS	1384	等级
男		722(52.16%)	0	单身		115(8.31%)	1
女		662(47.84%)	1	两口人		151(10.91%)	2
年龄(岁)	AGE	1384	等级	三口人		239(17.27%)	3
18~30岁		151(10.91%)	1	四口人		520(37.57%)	4
31~40岁		625(45.16%)	2	五口人		319(23.05%)	5
41~50岁		235(16.98%)	3	六口人		40(2.89%)	6
51~60岁		231(16.69%)	4	学历	EDU	1384	等级
60岁及以上		142(10.26%)	5	高中/中专及以下		657(47.47%)	0
户籍	HR	1384	虚拟	本科/大专及以上		727(52.53%)	1
外地		1000(72.25%)	0	家庭人均月收入/元	INCOME	1384	等级
本地		384(27.75%)	1	≤2000		102(7.37%)	1
小汽车拥有	CAR	1384	虚拟	2001~4000		291(21.03%)	2
否		556(40.17%)	0	4001~6000		440(31.79%)	3
是		828(59.83%)	1	6001~8000		261(18.86%)	4
房屋产权	HPR	1384	虚拟	8001~10000		151(10.91%)	5
非自有产权		213(15.39%)	0	>10000		139(10.04%)	6
自有产权		1171(84.61%)	1				

注：括号内数值为变量样本数占总样本量的比例。

2 理论模型构建

2.1 理论基础与研究假设

分布式认知理论是认知科学的新分支，来源于心理学对认知活动完整过程的研究，被认为是对认知现象研究的全新视角[24]。相比传统认知，分布式认知理论更强调认知主体、外部环境及社会文化层面之间的相互作用对认知活动的影响，而不是一味的考虑认知主体本身的局限性[25]。

Hatch和Gardner在教室的认知活动研究中提出了分布式认知的同心圆模型(图2)，该模型以个体与环境之间互动博弈的综合系统作为研究的理论基础，从“个人力”“地域力”和“文化力”3个方面对认知现象进行系统分析，这对处于复杂社会环境

下的个体认知活动具有较强解释力[26]。其中,“个人力”是在一定环境下受主观经验与倾向影响的鲜明个体[27],包括性别、年龄、家庭规模、学历、户籍、家庭人均月收入、小汽车拥有、房屋产权,为同心圆的核心;“地域力”是在本地情境中与认知活动互动的区域资源与客观环境[27],为同心圆的关键。相对就业地建成环境,居住地建成环境对居民通勤方式的选择影响更加显著[14]。因此,在本文中“地域力”为居住地建成环境;“文化力”是超越特定情境而对认知活动产生间接影响的惯例、偏好等评价[27-28],本文通过居民对于通勤模式的态度偏好进行分析,为同心圆的抽象内涵。

“个人力”“地域力”和“文化力”3个功能系统相互影响、互相关联[29],并最终影响个体的通勤模式选择(图2)。居民可以同时选择符合其偏好的居住环境和出行方式的过程是受潜在认知影响的,即“地域力”会受到“个人力”与“文化力”直接或间接的影响进而形成特定的通勤模式选择,这就是居住自选择效应。因此,提出假设1和假设2。假设1:居住自选择对建成环境与通勤模式选择的关系存在内生影响;假设2:建成环境对居民通勤模式选择存在直接影响;此外,小汽车拥有作为机动车使用的关键决定性因素[8],不应仅视为一个外生社会经济属性变量。忽视小汽车拥有及通勤距离的中介作用可能会降低建成环境变量对通勤模式选择的影响,忽略城市用地规划及运输政策的重要性。据此,提出假设3:通过小汽车拥有与通勤距离的中介作用,建成环境对居民通勤模式选择产生间接影响。

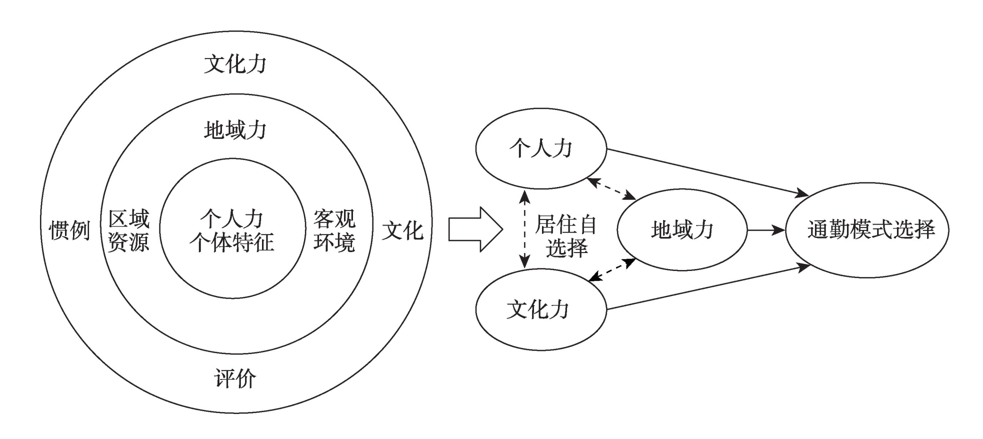


图2 基于同心圆模型的个体通勤模式选择分析框架

Fig. 2 Analysis framework of individual commuting pattern selection based on DCT

2.2 变量选取与模型构建

基于以上理论,个人可根据其自身社会经济属性及通勤模式偏好自行选择居住地点,从而模糊建成环境对通勤模式的影响。为考虑“个人力”“文化力”及“地域力”三者关系,解决居住自选择对通勤模式的内生影响[30],将社会经济属性及态度偏好设定为外生变量,建成环境、通勤距离、小汽车拥有及通勤模式选择设定为内生变量。而通勤距离与小汽车拥有并非单独对通勤模式选择产生影响,社会经济属性、态度偏好及建成环境的影响也会通过上述2个变量对通勤模式选择造成差异,将通勤距离和小汽车拥有设定为中介变量。至此,利用Amos 24.0软件构建完整的结构方程模型(图3)探究外生变量对内生变量以及内生变量之间的影响作用。

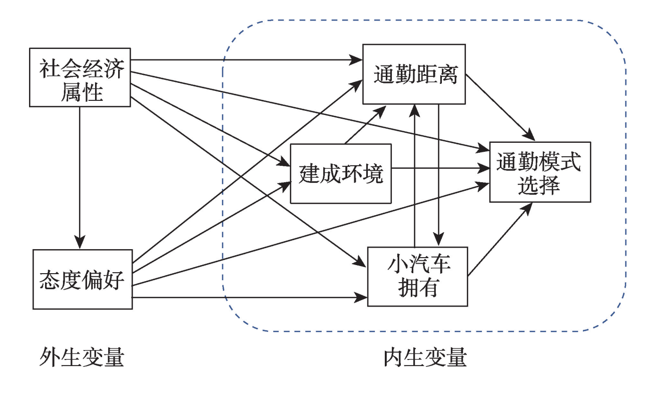


图3 结构方程模型的设定

Fig. 3 Setting of structural equation model

2.2.1 外生变量 将可能产生居住自选择效应的社会经济属性、态度偏好变量设定为外生变量。其中,社会经济属性变量包括性别、年龄、家庭规模、

学历、户籍、家庭人均月收入、房屋产权；态度偏好变量包括"绿色出行重要程度"（AP1）、"积极通勤模式意愿"（AP2）、"公共通勤模式意愿"（AP3）、"摩托车/电动车通勤模式意愿"（AP4）、"小汽车通勤模式意愿"（AP5）。采用李克特五级量表对选项"不重要-重要""不愿意-愿意"从低到高5个等级赋予1~5的分值。

2.2.2　内生变量　建成环境、通勤距离、小汽车拥有及通勤模式选择为内生变量。作为核心内生变量，建成环境的评价从密度、多样性、设计、目的地、到交通站点距离的"5D"维度出发在样本点15 min出行圈范围内测量建成环境特征（表2）。其中，15 min出行圈以居住小区正门作为圆心，基于道路数据及居民步行速度运用GIS网络分析模块中的OD成本矩阵构建交通网络模型生成2 km路网缓冲区（图1），并运用分析模块中的空间连接对属性数据匹配；密度包括人口密度与公共服务设施密度；多样性采用POI类型的熵指数表征土地利用混合度[8]；道路设计通过路网密度与交叉口比重衡量；到目的地距离通过样本点到公共广场中心的路径距离测量；到交通站点距离作为交通可达性的简单衡量指标，无法真正反映居民获得使用交通工具的机会。本文根据距离衰减规律对路径距离的长短赋值得到步行评分指数，用以表征居民到公交站点、地铁站点的可达性。此外，多数研究并未关注停车位对小汽车拥有和小汽车通勤模式的重要影响，因而添加停车位数量变量加以分析。为消除各指标量纲不统一的问题，采取极差标准化方法将各项指标等比例统一归于[0, 1]区间内，使得指标之间具有可比性。

通勤模式选择基于调查问卷数据中居民对于"您前往工作地所乘主要交通工具"问题的选项获得，并根据不同通勤方式所消耗能源及碳排放大小（表3）分为4类。其中，步行和自行车骑行能源消耗及碳排放最小，将其作为积极通勤模式；公交、地铁、班车或组合出行时，因载客容量大使得人均能源消耗及碳排放较小，将其作为公共交通通勤模式；电动车和摩托车为国内城市常见的通勤交通工具，相较于大型机动车能源消耗与碳排放小，作为摩托车/电动车通勤模式；小汽车通勤模式包括私家车、出租车，能源消耗及碳排放最大。

表2　建成环境变量说明及描述

Tab. 2　Built environmental variables measurement and description

维度	观察变量	变量符号	处理过程	均值	标准差
密度	人口密度/人·m^{-2}	RD	基于七普对Worldpop人口栅格数据修正，计算15 min出行范围内单位面积栅格人口数据	0.25	0.22
	公共服务设施密度/个·m^{-2}	PD	15 min出行范围内教育服务、交通设施、娱乐设施、餐饮购物、生活服务POI点数量/面积	0.01	0.07
多样性	土地利用混合度	LUM	15 min出行范围内各类POI点熵值数表示，取值范围0~1[10]	0.79	0.07
道路设计	路网密度/km·km^{-2}	RND	15 min出行范围内道路长度/面积	0.22	0.17
	交叉口比重/个·km^{-2}	CD	15 min出行范围内交叉口数量/面积	0.11	0.14
可达性	公交站可达性	BSI	基于步行指数测算15 min出行范围内样本点至公交站点的路径距离，再根据距离衰减规律对路径距离的长短赋值	0.97	0.11
	地铁站可达性	MSI	基于步行指数测算15 min出行范围内样本点至地铁站点的路径距离，再根据距离衰减规律对路径距离的长短赋值	0.24	0.35
目的地距离	距公共广场中心距离/km	DTC	居住点到主要公共广场西关什字的路径距离	0.35	0.25
	停车位数量	PARK	15 min出行范围内停车位数量	0.04	0.11

表3　机动化出行方式的能源消耗及其碳排放因子

Tab. 3　Specific energy consumption and CO_2 emission factor for motorized travel modes

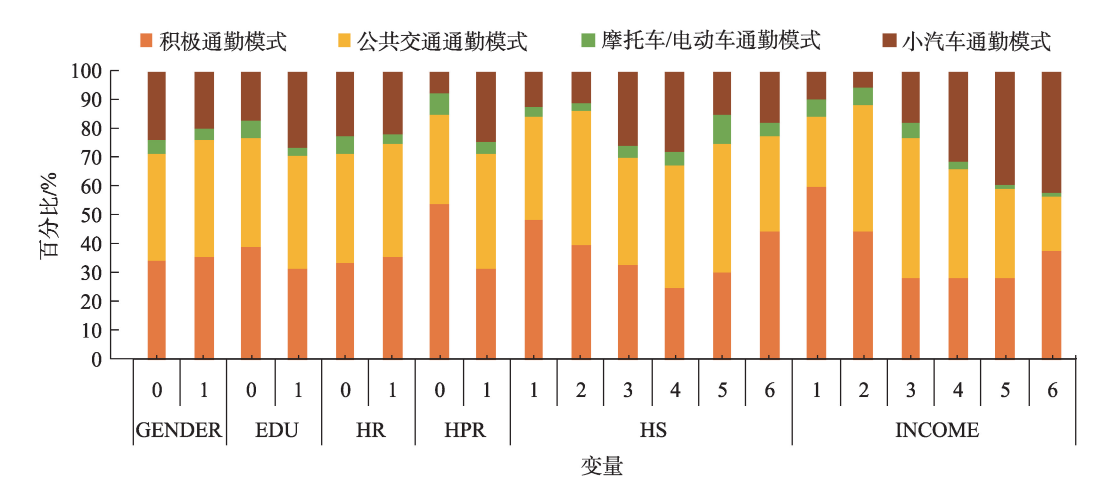
机动化出行方式	最终能源消耗/L·100^{-1}km,KWh·km^{-1}	容量/人	一次能源消耗/MJ·Pkm^{-1}	碳排放因子/g·Pkm^{-1}
小汽车	11.00	1.30	0.84	233.10
公交车	35.00	40.00	0.35	26.00
班车/楼巴	30.00	44.00	0.27	20.30
地铁	5.00	216.00	0.26	20.90
摩托车/电动车	1.50	1.20	0.70	50.00

注：根据关于中国交通碳排放的研究整理所得，此处碳排放为直接碳排放。

3 结果与分析

3.1 通勤模式选择特征分析

3.1.1 社会经济特征 不同社会经济属性的通勤模式选择不同(图4)。在不同类型通勤模式选择中各年龄段分布呈现一致性,平均年龄处于31~40岁间。男性和女性在通勤模式选择方面存在性别差异,在积极通勤与公共交通通勤模式中女性居民均高于男性居民,分别为35.8%与40.4%。与本科/大专及以上学历的居民通勤模式选择的概率31.3%相比,高中/中专及以下学历的居民在通勤中选择积极通勤模式的概率较高,为39.1%。外地户口居民较本地户口居民在通勤中选择摩托车/电动车通勤模式多。就房屋产权来说,非自有产权居民选择积极通勤模式较多,比例达53.7%,而自有产权居民通过积极通勤模式出行比例仅为31.6%,可能与非自有产权居民在租赁住房时更注重通勤距离有关。随着家庭规模的扩大,选择积极通勤模式的居民比例呈现"U"型分布,单身及六口之家选择积极通勤模式的比例最大,分别为48.7%与44.5%。选择积极通勤模式的居民随着家庭人均月收入等级的增加比例逐渐降低,收入≤2000元的居民选择积极通勤模式最高,为60.0%。而选择小汽车通勤模式的居民随着家庭人均月收入等级的增加比例逐渐增加,收入>15000元的居民选择小汽车通勤模式最高,为42.0%。这可能与居民对小汽车通勤成本的承担能力有关。



注:GENDER为性别;EDU为学历;HR为户籍;HPR为房屋产权;HS为家庭规模;INCOME为家庭人均月收入。横轴数值为各变量等级,详见表1。下同。

图4 不同社会经济属性下居民通勤方式比例

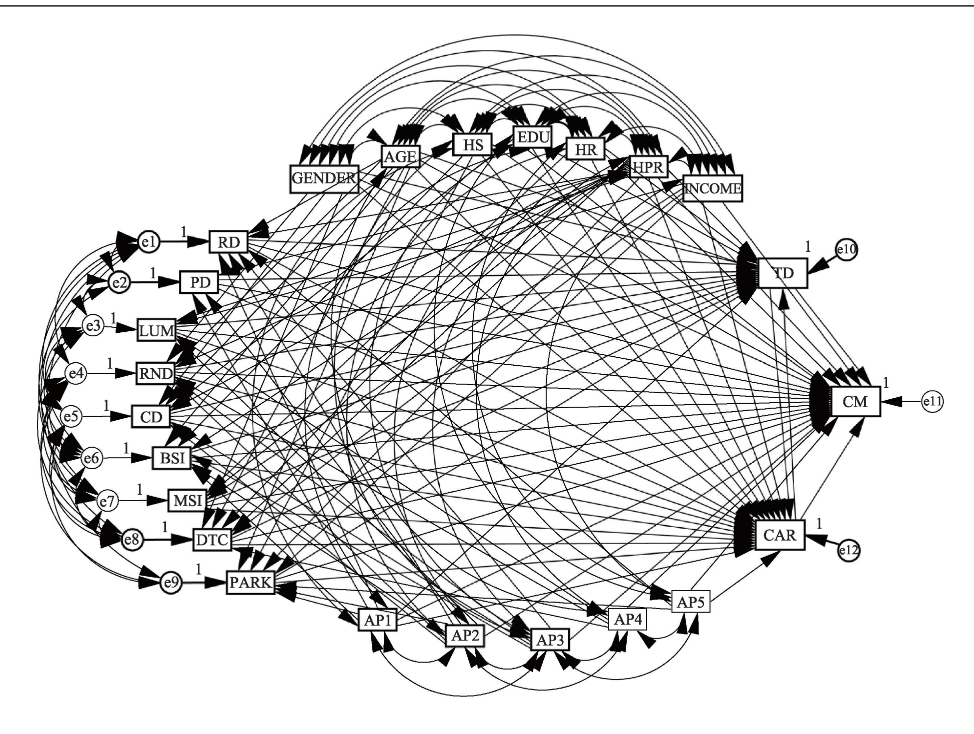
Fig. 4 Proportion of residents' commuting mode under different socioeconomic attributes

3.1.2 通勤模式选择特征 基于调查问卷统计结果可知居民通勤模式选择分布不均,选择积极通勤模式与公共交通通勤模式的概率较高,比例为35.0%与38.7%,合计73.7%。比例超过一半,表明兰州市居民在日常通勤中更倾向于绿色通勤。绿色通勤的概率在城市边缘区和受跨河、跨铁路条件限制的建成环境略低,而小汽车通勤模式在东西狭长的城市形态背景下对长距离通勤更具有优势。在四类通勤模式选择中,摩托车/电动车通勤模式作为较长距离出行的替代交通工具,概率较低,比例仅为4.3%。可能与兰州市特殊的天气气候特征有关[31],温带半干旱大陆性气候导致地表土层干燥疏松,狭长的河谷地形不仅加大了风速也阻碍了空中悬浮物的扩散,导致沙尘天气持续时间较长,能见度较低。且兰州市冬季寒冷漫长,回温较晚,对居民选择摩托车/电动车方式通勤造成阻碍。

3.2 建成环境对通勤模式选择的影响

3.2.1 结构方程模型适配度检验及修正 对样本数据构建结构方程模型(图5)并进行估算,验证性因子分析结果表明变量标准化路径系数小于0.95的标准[32]。在不违背理论假设的前提下有效降低模型卡方值,经修正后模型适配度指标及参考值(表4),各项指标均符合阈值要求,模型通过稳健性检验,拟合效果较好。

3.2.2 居住自选择效应解释 居民对居住小区建成环境的选择显著受到社会经济属性及态度偏好变



注：TD为通勤距离；CAR为小汽车拥有情况；CM为通勤模式选择；RD为人口密度；PD为公共服务设施密度；LUM为土地利用混合度；RND为路网密度；CD为交叉口比重；BSI为公交站可达性；MSI为地铁站可达性；DTC为距公共广场中心距离；PARK为停车位数量；e1~e9为残差；AP1~AP5分别为绿色出行重要程度、积极通勤模式意愿、公共通勤模式意愿、摩托车/电动车通勤模式意愿、小汽车通勤模式意愿；AGE为年龄（岁）。

图5　通勤模式结构方程的路径分析

Fig. 5　Path analysis of commuting mode structure equation

表4　模型适配度指标

Tab. 4　Model fitness indexes

适配度指数	注释	参考值	模型结果
绝对适配度指数			
χ^2	卡方值		194.358
GFI	拟合优度指标	>0.90	0.978
AGFI	调整后适度匹配指数	>0.90	0.949
RMR	残差均方和平方根	<0.05	0.022
RMSEA	渐进均方和平方根	<0.05	0.025
增值适配度指数			
NFI	规准适配指数	>0.90	0.953
IFI	增值适配指数	>0.90	0.986
TLI(NNFI)	非规准适配指数	>0.90	0.968
CFI	比较适配指数	>0.90	0.985
简约适配度指数			
PGFI	省检拟合优度指数	>0.5	0.415
PNFI	省检规准适配指数	>0.5	0.438
NC(χ^2自由度比值),CMIN/DF	卡方自由度比值	1~3	1.408

量的影响（表5），同时，社会经济属性及态度偏好对通勤距离、小汽车拥有与通勤模式选择存在显著影响。也就是说“地域力”会受到“个人力”与“文化力”的影响进而形成特定的通勤模式，即存在居住自选择效应。在假设1中，7个外生变量对建成环境与通勤模式选择的内生影响均显著。

就“个人力”来看，社会经济属性对居民选择居住小区建成环境及通勤模式选择产生显著影响。其中，居民的年龄与人口密度、路网密度及交叉口比重呈显著正相关，与通勤距离、小汽车通勤模式的选择呈显著负相关。随着家庭规模的扩大，15 min出行圈范围内公交可达性显著降低，小汽车拥有显著增加。相对于低教育程度的居民，教育程度高的居民多居住在交叉口比重低的地区，与小汽车通勤模式呈显著负相关。与低收入、租房者相比，高收入、自有产权的居民多注重土地利用混合度高及基础设施完备的小区，且与拥有小汽车及选择小汽车通勤模式呈显著正相关。就“文化力”来看，居民出行方式的态度偏好也对建成环境及通勤模式选择产生显著的影响。其中，积极通勤模式意愿与土地利用混合度、路网密度呈显著正相关，与小汽车通勤模式呈显著负相关。公共通勤模式意愿与路网密度、交叉口比重及公交站点可达性呈显著正相关，与小汽车通勤模式呈显著负相关。小汽车通勤模式意愿与停车位数量、小汽车拥有及小汽车通勤模式呈

表5 外生变量对内生变量影响的标准化回归系数

Tab. 5 Standardized estimates of exogenous variables on endogenous variables

外生变量	内生变量											
	GENDER	AGE	HS	EDU	HR	HPR	INCOME	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5
RD	–	0.132***	–	–	–	–	–	–	0.043	–	–	0.048
PD	–	–	–	–	–	–	–	–	0.050	–	–	–
LUM	–	–	–	–	–	0.046*	0.099***	–	0.055**	–	0.002	–
RND	0.066**	0.115***	–	–	–	–	–	–	0.038*	0.072**	0.017	–
CD	0.043	0.090**	–	−0.077***	–	–	–	–	–	0.124***	–	–
BSI	–	0.005	−0.057**	–	–	–	–	0.079*	−0.053	0.064**	–	–
MSI	–	–	–	–	0.057	–	−0.085**	–	–	–	–	–
DTC	0.062*	−0.071**	–	–	0.077**	–	−0.073**	–	–	–	0.059*	–
PARK	–	−0.054	−0.102***	–	–	0.066*	0.077**	–	0.061	–	–	0.071*
TD	0.078**	−0.075*	–	0.100**	−0.049	0.191***	–	0.042	–	–	–	–
CAR	0.092**	−0.044	0.136***	0.137***	0.041	0.144***	0.253***	−0.008	–	–	–	0.062*
CM	−0.072**	−0.102***	−0.030	−0.067*	0.003	0.063*	0.130***	−0.029	−0.036*	−0.071**	−0.032	0.021*

注:***、**、*分别代表$P<0.01$、$P<0.05$、$P<0.1$;行为因变量,列为自变量。AP1~AP5分别为绿色出行重要程度、积极通勤模式意愿、公共通勤模式意愿、摩托车/电动车通勤模式意愿、小汽车通勤模式意愿;TD为通勤距离;CM为通勤模式选择。下同。

显著正相关。而绿色出行重要程度、摩托车/电动车通勤模式意愿分别与公交站点可达性、距公共广场中心距离呈显著正相关,但与通勤模式选择的相关性并不显著。

3.2.3 影响因素分析 控制居住自选择效应后,进一步对建成环境各指标与通勤距离、小汽车拥有及通勤模式的路径关系进行探讨[30],结果表明建成环境一方面直接影响居民的通勤模式选择,另一方面通勤距离与小汽车拥有发挥中介作用,对通勤模式选择产生间接影响(表6),假设2和假设3均成立。

人口密度、路网密度及停车位数量变量对通勤模式选择具有显著的直接效应。具体来讲,人口密度对通勤模式选择存在负向的直接效应。人口密度过高可能会导致通勤高峰期更剧烈的交通拥堵,对于居民选择小汽车等机动车出行具有负向影响,因此高密度人口通常会引导更多的就业者在日常通勤中选择积极通勤模式。路网密度对通勤模式选择具有显著的负向效应。路网密度越大通常步行、骑行环境越友好,步行与骑行的人越多,居民日常通勤选择积极通勤模式的可能性就越大。而这与Zhang[33]对波士顿的研究结果略有不同,除积极通勤与路网密度呈正相关关系外,小汽车通勤与路网密度也存在显著的正相关关系。这可能与中国大城市建筑密度普遍较高有关,"小街区、密路网"一方面有利于提高步行通达性及步行与公共交通的衔接性,另一方面狭窄的道路对小汽车通勤与停放形成障碍,驾驶成本的增加大大降低了居民选择小汽车通勤的概率。停车位数量对通勤模式选择

表6 建成环境对通勤模式选择的影响

Tab. 6 Effects of urban built environment on commuting mode choices

变量	效应	RD	PD	LUM	RND	CD	BSI	MSI	DTC	PARK	CAR	TD
TD	总体效应	0.019	0.044	0.001	−0.153*	0.113*	−0.050	0.077*	0.049	0.085**	−0.078	−0.006
	直接效应	0.020	0.040	−0.002	−0.162*	0.116*	−0.055	0.073	0.046	0.083**	−0.078	–
	间接效应	−0.001	0.004	0.003	0.009	−0.003	0.005	0.005	0.003	0.002	–	−0.006
CAR	总体效应	0.012	−0.049*	−0.042	−0.112	0.038	−0.062*	−0.063*	−0.037	−0.023	−0.006	0.079
	直接效应	0.011	−0.052*	−0.042	−0.100	0.029	−0.058*	−0.069*	−0.040	−0.030	–	0.079
	间接效应	0.002	0.003	–	−0.012	0.009	−0.004	0.006	0.004	0.007	−0.006	–
CM	总体效应	−0.117***	0.010	−0.031	−0.211***	0.077	−0.031**	−0.023*	−0.036	0.044*	0.295***	0.285***
	直接效应	−0.126***	0.014	−0.018	−0.136*	0.035	0.002	−0.004	−0.037	0.029*	0.317***	0.261***
	间接效应	0.009	−0.004	−0.013	−0.076**	0.042	−0.033**	−0.018*	0.001	0.015*	−0.022	0.023

具有显著的正向效应，供给完备的停车设施提高了居民通过小汽车通勤的便利程度，同时增加了居民选择小汽车通勤的意愿。

路网密度、公交站点可达性、地铁站点可达性及停车位数量对通勤模式选择通过通勤距离与小汽车拥有产生显著的间接效应。路网密度对通勤距离存在显著的负向直接效应，同时对通勤模式选择存在显著的负向间接效应。15 min出行范围内路网密度高的区域可能通过降低居民通勤距离，间接降低居民选择小汽车通勤模式的可能性，这表明提高路网密度对于居民选择积极通勤模式是有效的。公交站与地铁站可达性对小汽车拥有具有显著的负向直接效应，同时对通勤模式选择均存在显著的负向间接效应。公交站与地铁站可达性越高，居民拥有小汽车的可能性越小，倾向积极通勤模式的可能性就越高。表明以公共交通为中枢、紧凑型发展的城市建成环境将改变居民以小汽车出行为主导的出行结构，从而增加选择积极交通通勤模式的可能性。停车位数量对通勤距离存在显著的正向直接效应，同时对通勤模式选择存在显著的正向间接效应。停车位数量越多，通勤距离越长，就业者选择小汽车通勤的可能性越大。由此可见，通勤距离与小汽车拥有在建成环境对通勤模式选择影响过程中发挥中介作用，尤其针对路网密度、公交站及地铁站可达性。公交站与地铁站可达性对通勤模式选择发挥完全中介作用，而路网密度对通勤模式选择的间接影响比直接影响更显著，约占总效应的35.55%。此外，公共服务设施密度、交叉口比重分别对小汽车拥有及通勤距离存在一定直接影响，进而对通勤模式选择产生间接影响，但间接影响并不显著。

4 讨论

本研究旨在为西北内陆中心城市建成环境对通勤模式选择的影响提供决策依据。首先，基于分布式认知理论，从“个人力”“文化力”和“地域力”三者关系出发结合受访者的社会经济属性与态度偏好对建成环境的影响，考虑了潜在的自我选择问题，避免过高估计建成环境的贡献。其次，相较传统的回归分析，结构方程模型更能进一步揭示通勤距离与小汽车拥有的中介作用，以及通勤模式与建成环境、通勤距离及小汽车拥有之间的内在联系。最后，关于建成环境指标，除将“5D”建成环境与“地域力”结合外，进一步关注了满足通勤模式的配套设施，并对距交通站点距离指标测度进行优化，利用步行评分指数表征到公交站点及地铁站的可达性，更全面地反映居民使用特定通勤方式的机会。

研究结果表明建成环境在居民通勤模式选择中并非仅起到直接影响作用，还通过通勤距离与小汽车拥有的中介作用对通勤模式选择产生间接影响。部分建成环境指标对通勤模式选择的影响验证了西方关于建成环境与出行行为关系的理论与假设，但也存在差异化的结论，与本文预期假设不符。例如研究发现，距公共广场中心距离及土地利用混合度对通勤模式选择的影响并不显著。可能的解释在于兰州市特殊的城市空间形态与功能结构。“两山夹一谷”的带状地形特征形成“多中心、组团式”的城市空间结构[34]，在分区平衡发展理念引导下，中心城区居民以行政辖区内通勤为主。就文中土地利用混合度的计算结果，熵值数均值为0.79，标准差为0.07，表明兰州市住宅小区15 min出行范围内是相对混合的土地利用。

以上研究发现突出体现了“情境”对“建成环境-通勤模式选择”关系的重要作用：地方情境，尤其是兰州市“带状多中心组团”的城市形态，加之高人口密度、高步行与公共交通依赖的特殊情境，与西方城市对机动车高度依赖不同，对“建成环境-通勤模式选择”关系的方向、显著性及弹性阈值造成影响，这也凸显了对与兰州市相似的西北内陆城市研究的必要性。此外，研究结果中建成环境各变量对通勤模式选择影响的效应值较小，可能产生与Stevens一致的判定：建成环境对通勤模式的影响可能是无弹性的，微不足道的[35]。然而多个建成环境变量的组合和协同效应可能是巨大的，因此在下一步的研究中应考虑多个建成环境变量组合或协同后对通勤模式产生的交互作用。

本文关于建成环境异质性的研究结果可为推进低碳交通网络体系、积极引导绿色出行及减少能源消耗的城市生态低碳交通政策提供依据。考虑到居民通勤模式在不同建成环境的异质性，对于低密度、疏路网与低可达性的建成环境，政府应积极引导城市建成环境内基础设施与公共资源的优化配置；交通设施向集约、高效、紧密衔接的模式发展，构建起基于轨道交通的城市综合交通体系。开

发新核心区域站点,考虑交通站点空间与周边功能衔接,完善居民出行链,为居民提供良好的出行环境并满足居民多样化的出行需求,从而为城市生态文明建设贡献交通智慧。

5 结论

(1)兰州市居民通勤模式选择多集中于积极通勤与公共交通通勤模式。社会经济属性及态度偏好本质上存在异质性,选择积极通勤与公共交通通勤模式的居民集中于低学历、外地户口、低收入、租赁房屋的单身或大规模家庭。

(2)"地域力"会受到"个人力"与"文化力"的影响进而形成特定的通勤模式,兰州市存在居住自选择效应。居民会根据自身社会经济属性及态度偏好选择不同建成环境的住宅小区,拥有高收入、小规模的家庭选择居住环境时偏向密路网、高可达性、高土地利用混合度及基础设施相对完善的居住环境,继而形成较为稳定的通勤模式选择。

(3)在规避居住自选择效应下,建成环境仍对通勤模式选择具有显著影响。人口密度、路网密度及停车位数量对通勤模式选择存在直接影响,路网密度、公交站点可达性、地铁站点可达性及停车位数量通过通勤距离与小汽车拥有的中介作用对通勤模式选择产生间接影响。

(4)高密度、密路网与高可达性的建成环境通过提高道路网络的连通性、步行与公共交通的连接性进一步推动积极通勤模式与公共交通通勤模式选择,引导居民向积极通勤模式为主导的出行结构转变。

参考文献(References)

[1] Ma J, Liu Z L, Chai Y W. The impact of urban form on CO_2 emission from work and non-work trips: The case of Beijing, China[J]. Habitat International, 2015, 47: 1-10.

[2] International Energy Agency (IEA). CO_2 emissions from fuel combustion 2016[R]. Paris: International Energy Agency, 2016: 1-166.

[3] 百度地图. 2018年度中国城市交通报告[EB/OL]. [2021-01-02]. https://jiaotong.baidu.com/landings/2018annualtrafficreport.html. [Baidu Map. China urban transportation report 2018[EB/OL]. [2021-01-02]. https://jiaotong.baidu.com/landings/2018annualtrafficreport.html.]

[4] Felix N N, Monday O A. Geographically weighted logistic regression approach to explore the spatial variability in travel behaviour and built environment interactions: Accounting simultaneously for demographic and socioeconomic characteristics[J]. Applied Geography, 2019, 108: 47-63.

[5] Danique T, Dorine C, Duives, et al. Cycling or walking? Determinants of mode choice in the Netherlands[J]. Transportation Research Part A, 2019, 123(5): 7-23.

[6] Cheng L, Chen X, Yang S, et al. Active travel for active ageing in China: The role of built environment[J]. Journal of Transport Geography, 2019, 76: 142-152.

[7] Mahmoud M. Bus quality assessment using perception and attitude measures[D]. Northern Ireland: University of Ulster, 2012.

[8] Ding C, Wang D, Liu C, et al. Exploring the influence of built environment on travel mode choice considering the mediating effects of car ownership and travel distance[J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 2017, 100(6): 65-80.

[9] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment: A synthesis [J]. Transportation Research Record, 2011, 1780(1): 87-114.

[10] 鲁大铭, 赵雅静, 张文佳. 中西方城市建成环境与出行行为研究比较[J]. 国际城市规划, 2023, 38(6): 59-66. [Lu Daming, Zhao Yajing, Zhang Wenjia. Comparison of researches on the built environment and travel behavior of Chinese and western cities[J]. Urban Planning International, 2023, 38(6): 59-66.]

[11] Feng J, Dijst M, Wissink B, et al. Understanding mode choice in the Chinese context: The case of Nanjing metropolitan area[J]. Science Letter, 2014. 105(3): 315-330.

[12] 孙斌栋, 但波. 上海城市建成环境对居民通勤方式选择的影响[J]. 地理学报, 2015, 70(10): 1664-1674. [Sun Bindong, Dan Bo. Impact of urban built environment on residential choice of commuting mode in Shanghai[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70 (10): 1664-1674.]

[13] 韦亚平, 潘聪林. 大城市街区土地利用特征与居民通勤方式研究: 以杭州城西为例[J]. 城市规划, 2016, 36(3): 76-84. [Wei Yaping, Pan Conglin. Urban land-use characteristics and commuters' travel pattern: A case study of west Hangzhou[J]. City Planning Review, 2012, 36(3): 76-84.]

[14] Zhao Y, Chai Y W. Residents' activity-travel behavior variation by communities in Beijing, China[J]. Chinese Geographical Science, 2013(4): 14, doi: 10.1007/s11769-013-0616-7.

[15] 孙斌栋, 阎宏, 张婷麟. 社区建成环境对健康的影响: 基于居民个体超重的实证研究[J]. 地理学报, 2016, 71(10): 1721-1730. [Sun Bindong, Yan Hong, Zhang Tinglin. Impact of community built environment on residents' health: A case study on individual overweight[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(10): 1721-1730.]

[16] Lu Y, Sun G, Sarkar C, et al. Commuting mode choice in a high-density city: Do landuse density and diversity matter in Hong Kong?[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018. 15(5): 920-934.

[17] Patricia L, Mokhtarian, Cao X. Examining the impacts of residen-

tial self-selection on travel behavior: A focus on methodologies[J]. Transportation Research Part B, 2007, 42(3): 204-228.

[18] 黄晓燕, 曹小曙, 殷江滨, 等. 城市轨道交通和建成环境对居民步行行为的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1256-1271. [Huang Xiaoyan, Cao Xiaoshu, Yin Jiangbin, et al. The influence of urban transit and built environment on walking[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1256-1271.]

[19] 杨励雅, 王振波. 居住区建成环境对居民出行行为影响的分层线性模型[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 101-108. [Yang Liya, Wang Zhenbo. Impact of residential built environment on daily travel behavior[J]. Economic Geography, 2019, 39(4): 101-108.]

[20] 张雪, 周素红, 陈菲. 基于出行链的建成环境对居民小汽车通勤出行的影响[J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 671-680. [Zhang Xue, Zhou Suhong, Chen Fei. Impact of the built environment on residents' car commuting based on trip chain[J]. Progress in Geography, 2021, 40(4): 671-680.]

[21] Michael N, Bagley, Patricia L, et al. The impact of residential neighborhood type on travel behavior: A structural equations modeling approach[J]. The Annals of Regional Science, 2002, 36(2): 279-297.

[22] 曹晨, 甄峰, 姜玉培. 邻里环境感知与个体健康对通勤模式选择的影响研究——以南京市为例[J]. 地理研究, 2021, 40(10): 2823-2837. [Cao Chen, Zhen Feng, Jiang Yupei. The influence of neighborhood environmental perception and individual health on commuting mode choice: A case study of Nanjing City, China[J]. Geographical Research, 2021, 40(10): 2823-2837.]

[23] Paulus T A, Cao X, Corinne M. Understanding neighbourhood design impact on travel behaviour: An application of structural equations model to a British metropolitan data[J]. Transportation Research Part A, 2011, 46(1): 22-32.

[24] Hatch T, Gardner H. Finding cognition in the classroom: An expanded view of human intelligence in Salomon G. Distributed cognitions: Psychological and educational considerations[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 164-188.

[25] 吴萌, 甘臣林, 任立, 等. 分布式认知理论框架下农户土地转出意愿影响因素研究——基于SEM模型的武汉城市圈典型地区实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(9): 62-71. [Wu Meng, Gan Chenlin, Ren Li, et al. Analysis on influencing factors of farming households' willingness to land conversion under the distributed cognition theory: An empirical evaluation of Wuhan urban cirele by SEM[J]. China Population, Resoures and Environment, 2016, 26(9): 62-71.]

[26] 任立, 吴萌, 甘臣林, 等. 城市近郊区农户土地投入风险认知及影响因素研究: 基于分布式认知理论的微观调查实证[J]. 中国土地科学, 2019, 33(9): 66-73. [Ren Li, Wu Meng, Gan Chenlin, et al. Influencing factors of farmers' risk perception on land investment in the suburbs: An empirical research based on DCT[J]. China Land Science, 2019, 33(9): 66-73.]

[27] 杨永春, 孙燕, 李建新, 等. 藏、汉对比视角下的城市空间环境认知研究——以中国西藏日喀则市为例[J]. 地理科学, 2019, 39(2): 334-341. [Yang Yongchun, Sun Yan, Li Jianxin, et al. Urban spatial environmental cognition of both Tibetan and Han from a comparative perspective: A case study of Shigatse in Tibet[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(2): 334-341.]

[28] 潘爱华, 李梦梦, 孙前路. 分布式认知理论视角下农户畜禽粪污处理参与意愿研究——基于异构选择有序Logit模型的分析[J]. 高原农业, 2021, 5(2): 191-200. [Pan Aihua, Li Mengmeng, Sun Qianlu. Farmers' awareness of rural human environment and their willingness to participate in sewage treatment: Based on heterogeneous selection ordered logit model[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2021, 5(2): 191-200.]

[29] 张晶飞, 秦耀辰, 张丽君, 等. 建成环境对居民绿色消费意愿的影响——来自郑州的实证研究[J]. 地理研究, 2021, 40(10): 2914-2929. [Zhang Jingfei, Qin Yaochen, Zhang Lijun, et al. Influence of the built environment on urban residential green consumption willingness in Zhengzhou, China[J]. Geographical Research, 2021, 40(10): 2914-2929.]

[30] 杨文越, 曹小曙. 居住自选择视角下的广州出行碳排放影响机理[J]. 地理学报, 2018, 73(2): 346-361. [Yang Wenyue, Cao Xiaoshu. The influence mechanism of travel-related CO_2 emissions from the perspective of residential self-selection: A case study of Guangzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(2): 346-361.]

[31] 李鸿飞, 何颖茹, 毕晓莉. 黄河流域兰州段生态环境与高质量发展耦合协调关系研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1244-1253. [Li Hongfei, He Yingru, Bi Xiaoli. Coupling coordination relationship between ecological environment and high-quality development in Lanzhou section of Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1244-1253.]

[32] 吴明隆. 结构方程模型——AMOS的操作与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2010: 5-52. [Wu Minglong. The structural equation model: Operation and application of AMOS[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2010: 5-52.]

[33] Zhang M. The role of land use in travel mode choice: Evidence from Boston and Hong Kong[J]. Journal of the American Planning Association, 2004, 70(3): 344-360.

[34] 晁勐, 张俊, 刘翔. 兰州市主城区房价分异及驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 2004-2012. [Chao Meng, Zhang Jun, Liu Xiang. Research on housing price differentiation and driving factors in central urban area of Lanzhou City[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 2004-2012.]

[35] Mark R S. Does compact development make people drive less?[J]. Journal of the American Planning Association, 2016, 83(1): 7-18.

Impact of urban built environment on commuting mode choices from the residential self-selection perspective

GUO Yan, ZHANG Zhibin, CHEN Long, MA Xiaomin, ZHAO Xuewei
(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Research on travel mode choice is essential for efficient, sustainable, and safe urban traffic planning. This study selected the main urban area of Lanzhou City, Gansu Province, China as the study area, and based on the distributed cognitive theory, questionnaire data, road network data, and Point of Interest (POI) data. The structural equation model was used to explore the impact of nonrandom heterogeneity of the built environment on selecting the commuting mode under the influence of the residential self-selection effect. The study found that: (1) Residents chose residential quarters with different built-environment characteristics according to their socioeconomic attributes and attitude preferences. Subsequently, they formed a specific commuting pattern, indicating preference heterogeneity in residential self-selection and the existence of the residential self-selection effect. (2) The built environment continued to have a considerable impact on the choice of commuting mode even after avoiding the self-selection effect of residence. Specifically, population density, road network density, and the number of parking spaces directly affected the choice of commuting mode. Road network density, bus station accessibility, subway station accessibility, and the number of parking spaces indirectly influenced the choice of commuting mode through mediating variables, such as commuting distance and car ownership. (3) High-population density, dense road network, and high-accessibility of the built environment increased the active and public transportation commuting modes. This was achieved by improving the connectivity of road networks, connection between walking and public transit, and pedestrian-friendly environment and by guiding residents to a shift in the travel structure, led by active commuting patterns.

Key words: built environment; commuting mode choices; residential self-selection; structural equation model (SEM); Lanzhou City